



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**NOTA TÉCNICA CONJUNTA LabISA/INPE, CEBIMAR/USP E
GCER/MISSISSIPPI STATE UNIVERSITY - “MARÉ VERMELHA”
NAS PRAIAS DE SÃO SEBASTIÃO E ILHABELA EM JANEIRO
DE 2025**

Daniel Andrade Maciel

Bruno Rech

Júlio Cesar Pimenta dos Santos

Rejane Paulino

Vitor Souza Martins

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo

Aurea Ciotti

Claudio Clemente Faria Barbosa

INPE
São José dos Campos
2025

Nota técnica conjunta LabISA/INPE, CEBIMAR/USP e GCER/Mississippi State University - “Maré vermelha” nas praias de São Sebastião e Ilhabela.

Daniel Andrade Maciel¹, Bruno Rech¹, Julio Cesar Pimenta dos Santos¹, Rejane Paulino², Vitor Souza Martins², Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹, Aurea Ciotti³, Claudio Clemente Faria Barbosa¹.

¹Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Laboratório de Instrumentação em Sistemas Aquáticos (LabISA), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

²*Geospatial Computing for Environmental Research (GCER) - Mississippi State University*

³Centro de Biologia Marinha da Universidade de São Paulo, Laboratório Aquarela, Universidade de São Paulo (USP)

Apoio Financeiro: Projetos FAPESP: 2020/14613-8, 2021/13367-6, 2023/13904-7, 2024/06636-9.

O monitoramento da qualidade da água nas praias é crucial para garantir a segurança dos banhistas, especialmente em regiões litorâneas com alta atividade turística. Entre os dias 12 a 24 de janeiro de 2025, navegadores e pescadores nas cidades de Ilhabela e São Sebastião, no litoral norte do estado de São Paulo, relataram a presença de extensas manchas vermelhas, desde a linha da costa até áreas mais afastadas, como o arquipélago de Alcatrazes (Figura 01). Essas florações, popularmente chamadas de “marés vermelhas”, são causadas pela grande densidade de organismos microscópicos fotossintetizantes e dos pigmentos presentes em suas células. Nestes eventos em particular, amostras observadas em microscópio no CEBIMar/USP indicaram a presença de *Mesodinium rubrum*, um ciliado mixotrófico (ou seja, pode se alimentar e fotossintetizar). Altas densidades de *Mesodinium*, se estendendo por quilômetros, já foram reportadas na costa sudeste em 2014. Apesar desse organismo não compor o grupo de organismos que gera florações potencialmente tóxicas, o declínio de concentrações elevadas pode promover a entrada de matéria orgânica em decomposição na coluna d’água e promover hipóxia. Por outro lado, o organismo identificado, *Mesodinium rubrum*, tem uma história de vida particular, sendo a principal presa de um outro grupo de organismos capazes de florescer, os dinoflagelados, que são potencialmente tóxicos e pertencentes ao gênero *Dinophysis*. Estes são produtores potenciais de ácido ocadaico que, se acumulado em mexilhões e outros organismos, podem causar problemas gastrointestinais graves. De fato, em 2016, uma mancha com quilômetros de extensão, levou o governo de São Paulo a impor o primeiro embargo comercial na produção e no consumo de ostras e mexilhões devido à presença de biotoxinas nas amostras testadas. Assim, criar ferramentas para monitorar a ocorrência e a distribuição de *Mesodinium* no tempo e no espaço pode ser uma estratégia crucial para antecipar os potenciais danos causados por *Dinophysis*. Uma ferramenta assim permitirá que as autoridades ambientais do estado de São Paulo possam alertar a população e guiar os banhistas de maneira eficiente. Além disso, observar as florações no tempo e no espaço, otimizam os grandes gastos das coletas em campo e necessárias análises do plâncton ou toxinas presentes.

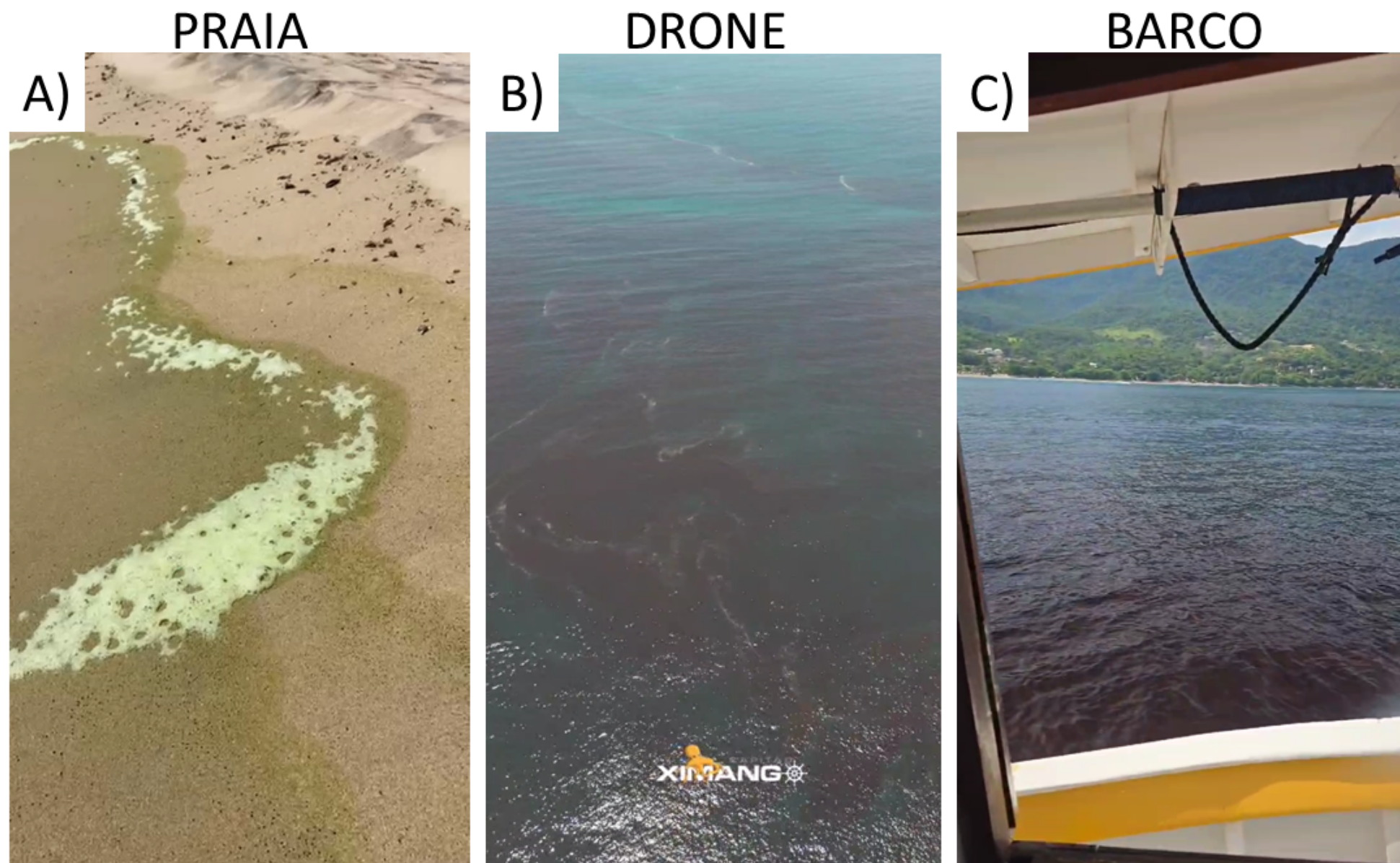


Figura 1. Avistamentos da maré vermelha in-situ. Fonte: Gustavo Luiz Benedito dos Santos, comandante da embarcação Capitão Ximango (<https://www.instagram.com/cap.ximango>)

Dados as características específicas desse organismo, cujos pigmentos presentes nas células alteram a cor do oceano de forma previsível, imagens de sensoriamento remoto são uma das ferramentas mais promissoras para auxiliar o monitoramento desses episódios. Satélites que orbitam a Terra podem capturar imagens da área em intervalos de 1 a 5 dias, oferecendo uma visão detalhada da dinâmica das manchas ao longo do tempo, apesar de sujeitas à presença de nuvens. Estas imagens são úteis para orientar o levantamento de amostras in situ para identificar as espécies envolvidas, o risco, a provável área afetada, possibilitando ações de mitigação para salvaguardar a saúde da população. Nesse contexto, o **Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LabISA-INPE)**, em parceria com o **Laboratório Aquarela do Centro de Biologia Marinha da Universidade de São Paulo** e a **Mississippi State University** realizaram uma análise espaço-temporal da evolução do evento de maré vermelha causado por *Mesodinium rubrum* ao longo da costa de São Sebastião e Ilhabela entre 12 a 25 de janeiro.

Para essa análise, foram utilizadas imagens dos satélites *Sentinel-2/MSI* e *Sentinel-3/OLCI*, ambos desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA). Esses satélites permitem monitorar a região com uma resolução temporal de 1 a 5 dias e uma resolução espacial que varia entre 10 e 300 metros, proporcionando uma visão detalhada da propagação das manchas em diferentes escalas. Inicialmente, o mapeamento da maré vermelha foi realizado utilizando os dados do sensor *Sentinel-3/OLCI*, que possibilitaram acompanhar as alterações dos locais e áreas de ocorrência das manchas ao longo dos dias. Nesse evento em particular, tivemos um grande apoio das embarcações locais (Capitão Ximango, Balerina¹ Santa Clara), e de técnicos e embarcações do CEBIMar, ICMBio e do Parque Estadual da Ilhabela, além de algumas imagens obtidas pela embarcação Capitão Ximango com indicações claras da presença manchas vermelhas na costa de São Sebastião e Ilhabela. (Figura 1). Os mapas (Figura 2) revelam as alterações da localização e de extensão das manchas (marcadas em vermelho) que se deslocam em direção ao continente, especialmente a partir de 15 de janeiro de 2025 (datas no canto superior direito da figura). É possível observar que as manchas se concentram nas proximidades de Ilhabela e ao sul de São Sebastião a partir do dia 20 de janeiro. Na última imagem, de 25 de janeiro de 2025, as manchas foram concentradas bem próximo à costa, na praia de Indaiatuba, em Ilhabela. Ao longo dos dias, obtivemos várias informações das embarcações citadas, que nos forneceram horários e coordenadas das observações das manchas, e amostras, que puderam ser identificadas em microscópio no CEBIMar. Na totalidade das vezes, as manchas corresponderam a altas concentrações de *Mesodinium rubrum*, e de certa forma, auxiliaram nas escolhas para o processamento empregado nas imagens e como verdades de campo, identificando corretamente a localização das manchas pelas imagens. A análise das imagens utilizou o produto de nível L2W do *OLCI*². O uso dessa tecnologia permite a visualização em tempo quase real das mudanças no ambiente marinho capazes de alterar a cor do oceano, fornecendo assim, dados valiosos para a gestão ambiental e ferramentas de auxílio para a segurança das comunidades costeiras.

¹ Júlio Cardoso. Mais informações: <https://www.instagram.com/projetobaleiaavista/>

² Mais informações sobre o Sentinel-3/OLCI podem ser obtidas em: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s3-olci-instrument>

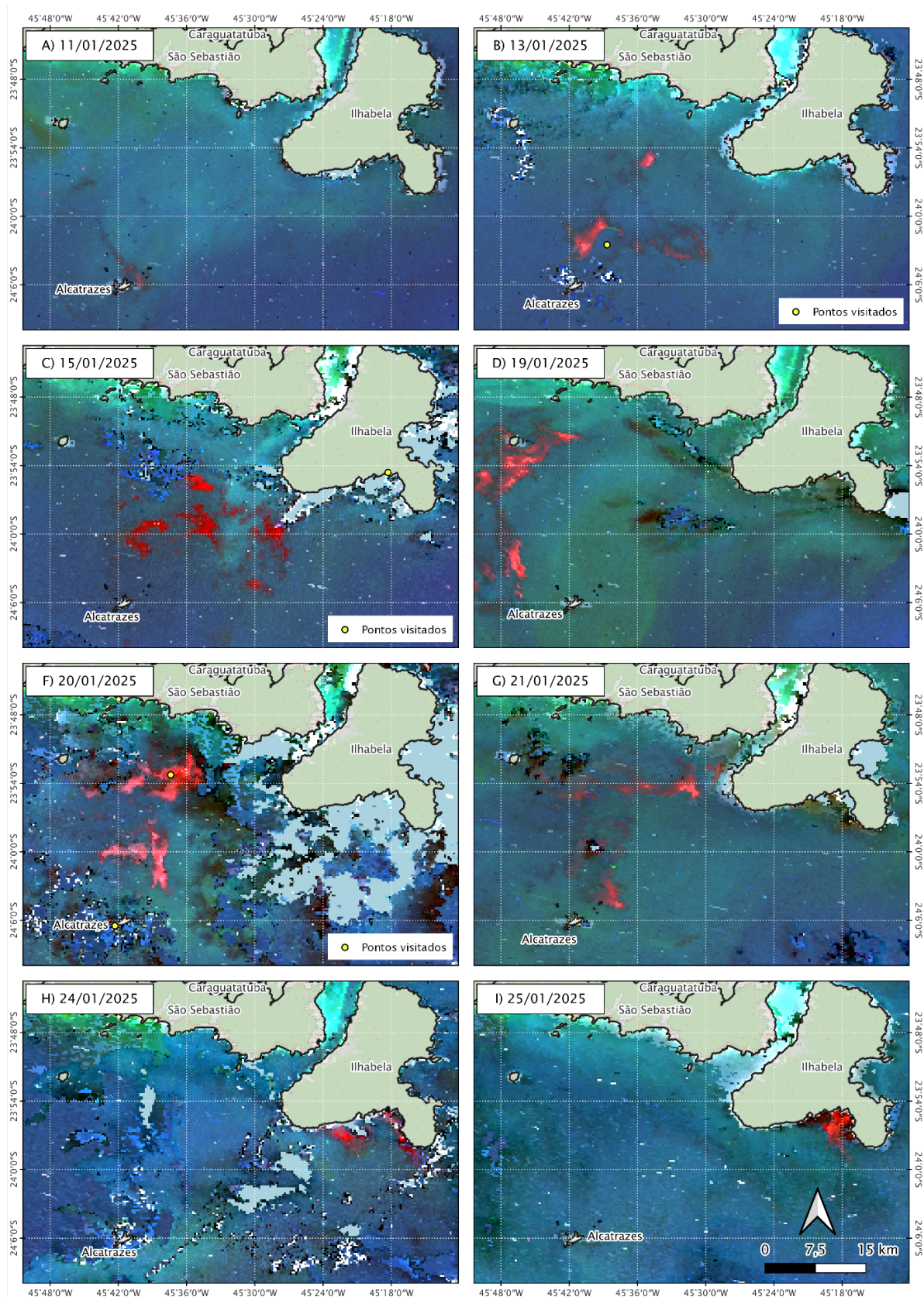


Figura 2. Imagens OLCI/Sentinel-3 em composição falsa-cor (R11-G6-B4) entre os dias 11 e 25/01/2025. Em todas as imagens, obtemos coordenadas e observações em microscópio que corresponderam ao padrão ilustrado no tratamento das mesmas.

Análise da Mancha da Maré Vermelha com o Sentinel-2/MSI: Processamento e Resultados

Além da análise com o *Sentinel-3/OLCI*, foi realizada também uma avaliação utilizando imagens do satélite *Sentinel-2/MSI*³, com o objetivo observar a mancha da maré vermelha em uma escala espacial maior. No entanto, devido à menor frequência de revisita do *Sentinel-2/MSI* (apenas a cada 5 dias), não foi possível acompanhar a posição da mancha em todos os dias em que as informações in situ foram disponibilizadas.

O processamento das imagens do *Sentinel-2/MSI* seguiu as etapas descritas abaixo:

1. **Aquisição e pré-processamento das imagens:** As imagens foram baixadas a partir do final de dezembro de 2024, em nível L2 (reflectância de superfície).
2. **Máscara de áreas de água:** Utilizou-se a máscara fornecida no produto *Scene Classification Layer* (SCL) para isolar as áreas de água, garantindo que as análises ficassem restritas às regiões de água.
3. **Remoção de nuvens residuais:** Realizou-se a remoção de nuvens com valores de reflectância no SWIR acima de 0.02;
4. **Correção de glint:** A correção de glint foi realizada pela subtração da banda SWIR-2 (banda 12), a fim de minimizar o impacto da luz refletida na superfície da água.
5. **Cálculo do *Normalized Difference Chlorophyll Index* (NDCI):** O NDCI foi calculado utilizando a fórmula:

$$NDCI = \frac{p(705) + p(660)}{p(705) - p(660)}$$

6. **Redução de ruído:** Para reduzir o ruído causado pela alta resolução espacial em águas muito claras, o tamanho do pixel foi alterado para 40 metros.
7. **Identificação das áreas com florações de *Mesodinium rubrum*:** A partir do valor do NDCI, foi aplicada uma máscara para separar os pixels com valores acima de 0.015, considerados como possíveis concentrações elevadas de pigmentos.
8. **Filtragem para redução de ruído:** Para mitigar o efeito "sal e pimenta", foi aplicado um filtro de moda em uma janela de 3x3 pixels, suavizando os dados finais.

A **Figura 3** ilustra as alterações nas posições das manchas de maré vermelha nos dias 10/01/2025, 15/01/2025 e 20/01/2025 através das imagens do *Sentinel-2/MSI* em cor verdadeira, e a Figura 4 são as mesmas imagens em falsa-cor, para destacar ainda mais as manchas. As imagens mostram a evolução e o deslocamento da mancha ao longo da costa, destacando a dinâmica da maré vermelha ao longo do tempo, conforme detectado pelas imagens do *Sentinel-2/MSI*³

³ Sentinel-2/MSI: Mais informações sobre o satélite podem ser obtidas em: <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission>

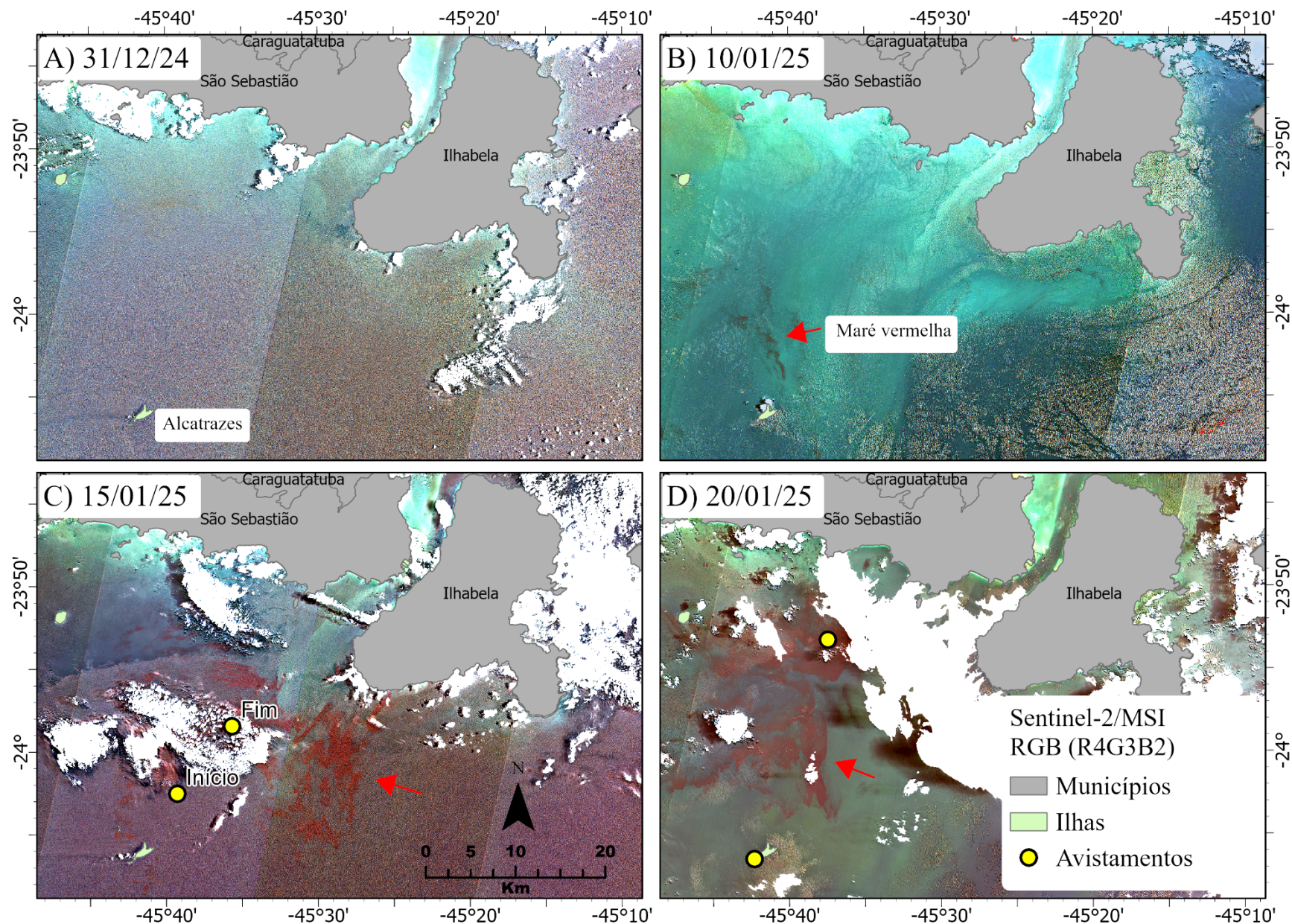


Figura 3. Imagens MSI/Sentinel-2 em composição cor verdadeira. A) Dia 31/12/2024. B) Dia 10/01/2025. C) Dia 15/01/2025. D) Dia 20/01/2025. Avistamentos (horários e coordenadas), providos pelas embarcações Capitão Ximango, Santa Clara, e botes do ICMBio

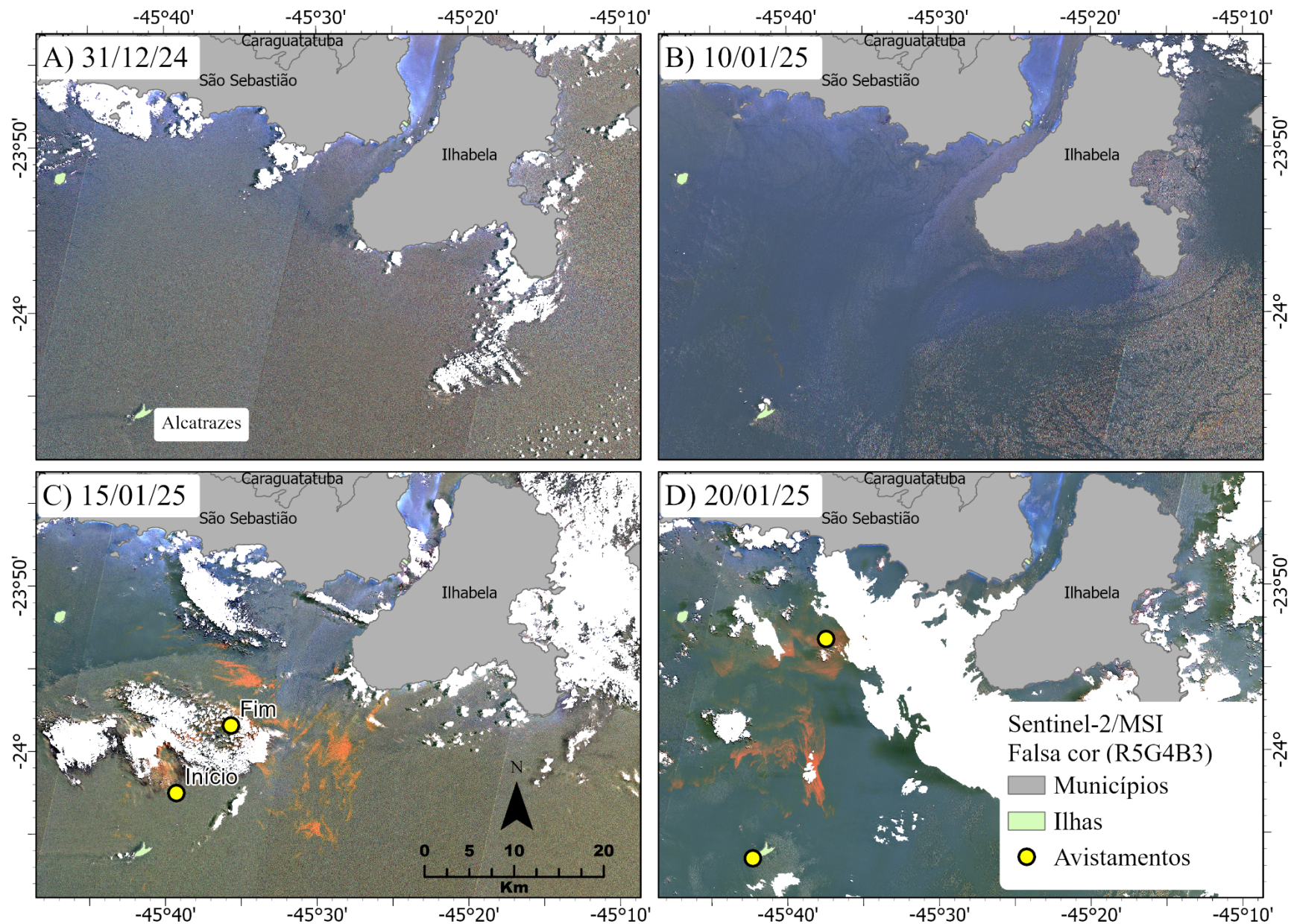


Figura 4. Imagens MSI/Sentinel-2 em composição falsa-cor. A) Dia 31/12/24. B) Dia 10/01/25. C) Dia 15/01/25. D) Dia 20/01/25. Avistamentos (horários e coordenadas), providos pelas embarcações Capitão Ximango, Santa Clara, e botes do ICMBio.